

De las observaciones atmosféricas y el análisis de los gases de efecto invernadero a la estimación de emisiones: una aventura científica

por Shamil Maksyutov¹, Dominik Brunner², Alistair Manning³, Paul Fraser⁴, Oksana Tarasova⁵ y Claudia Volosciuk⁵

Los efectos del cambio climático son cada vez más evidentes. Los gobiernos abordan el desafío del cambio climático a través de acuerdos internacionales como el Acuerdo de París en 2015. Para evaluar el progreso hacia los objetivos climáticos, los gobiernos han adoptado un proceso de informe nacional de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) siguiendo protocolos acordados. Esos protocolos han sido establecidos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y fueron descritos en las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2006). En mayo de 2019, en la reunión plenaria del IPCC se aprobó un *Perfeccionamiento de las Directrices* (en imprenta), que reseña el importante papel de las observaciones y los análisis atmosféricos para mejorar las estimaciones de las emisiones nacionales de GEI. El *Perfeccionamiento de 2019* describe los componentes fundamentales y los pasos a seguir cuando se usan mediciones atmosféricas y modelos inversos para la comparación con inventarios estimados (capítulo 6, Garantía de calidad/Control de calidad y verificación).

Las mediciones atmosféricas exactas y precisas de los principales GEI han revelado un aumento en sus

concentraciones a nivel mundial (figura 1). Sin embargo, las concentraciones de sustancias que agotan el ozono, que también son GEI, han disminuido en la última década, como consecuencia de la aplicación del Protocolo de Montreal. La red mundial de observaciones de GEI, coordinada por el programa de Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) de la OMM, nos proporciona avisos de cambios peligrosos en el sistema climático.

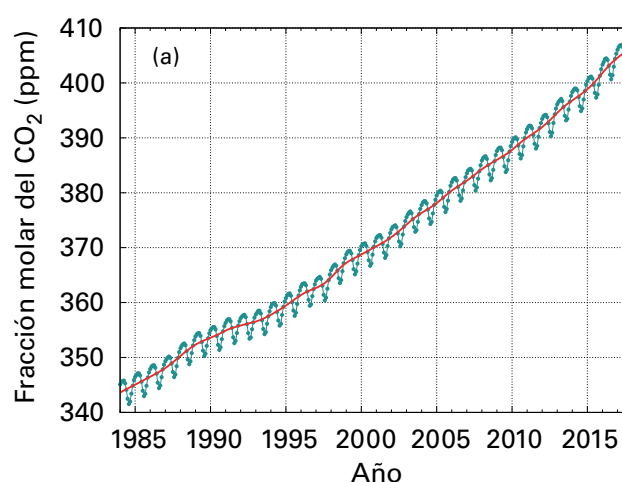


Figura 1. Promedio mundial de la fracción molar del dióxido de carbono (CO₂) de las observaciones en estaciones que contribuyen al programa de la VAG. (Fuente: OMM, 2018).

Las concentraciones atmosféricas de GEI son el resultado del equilibrio entre las fuentes y los sumideros (figura 2) y están influenciadas por los procesos de transporte y mezcla. Para limitar el calentamiento global es importante cuantificar las fuentes ya que pueden controlarse. Sin embargo, estimar las emisiones a partir de las observaciones atmosféricas no es una tarea trivial, ya que es necesario

-
- 1 Instituto Nacional de Estudios Ambientales, Japón
 - 2 Laboratorio Federal Suizo de Ciencia y Tecnología de Materiales (Empa)
 - 3 Servicio Meteorológico, Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte
 - 4 Departamento de Estudios Oceánicos y Atmosféricos de la Organización de Investigaciones Científicas e Industriales de la Commonwealth (CSIRO), Australia
 - 5 Secretaría de la OMM

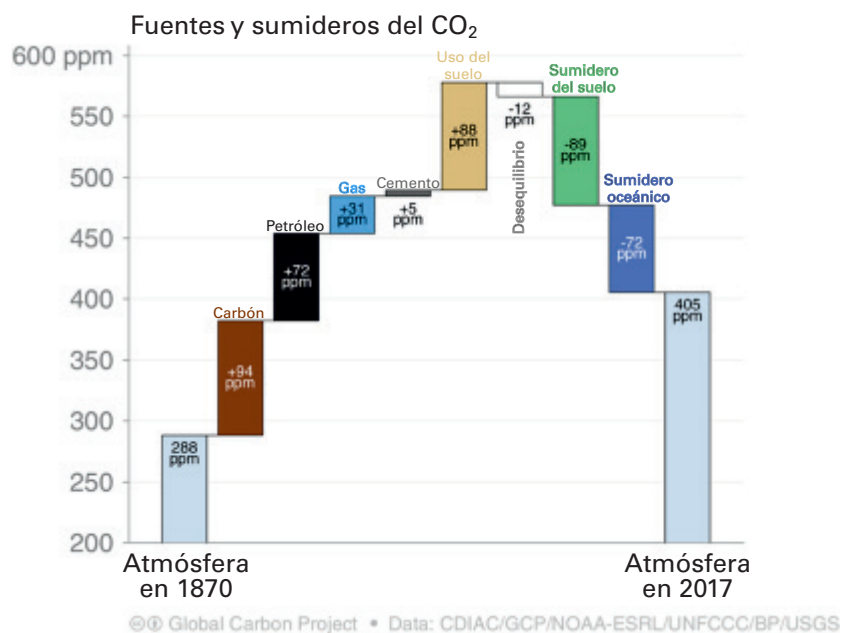


Figura 2. Las concentraciones atmosféricas de GEI son un equilibrio entre las fuentes (lo que llega a la atmósfera) y los sumideros (lo que se extrae de ella). El gráfico muestra las contribuciones acumulativas al balance global de carbono desde 1870. El desequilibrio de carbono representa la brecha en nuestra comprensión actual de las fuentes y sumideros. (Fuente: Global Carbon Budget 2018, Global Carbon Project).

obtener una relación entre las concentraciones en un punto de observación dado y las fuentes corriente arriba. Esta relación está determinada por el transporte atmosférico y puede simularse mediante un modelo de transporte atmosférico. Hacer esto con precisión implica una gran demanda en el rendimiento del modelo.

Los primeros intentos de uso de las observaciones atmosféricas para estimar las emisiones de GEI datan de la década de 1980 (p.ej. CFC-11, Fraser y otros, 1983). Estos primeros estudios abordaron en gran medida escalas globales a continentales basándose en modelos de baja resolución y en observaciones de una red mundial dispersa, principalmente del programa de muestreo global en matraces de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA). La cuantificación de emisiones a gran escala es esencial, pero solo describe las emisiones globales netas que determinan el incremento de los GEI de larga permanencia en la atmósfera. Sin embargo, estas estimaciones proporcionan poca información sobre las fuentes y los procesos individuales requerida por las instancias normativas, que necesitan emprender acciones en los ámbitos nacional, subnacional y regional. Con la expansión de la red de observación, especialmente en los países desarrollados, y las crecientes capacidades y resoluciones de los modelos de transporte atmosférico, es posible estimar las emisiones a escalas nacionales más pequeñas.

Las comunidades científicas dedicadas al estudio de la atmósfera, el ciclo del carbono y el cambio climático han

producido una serie de estudios sobre el potencial de las mediciones de las concentraciones atmosféricas de GEI y de los análisis de modelos para evaluar y ayudar a notificar estimaciones mejoradas de las emisiones de GEI (por ejemplo, National Research Council, 2010; Ciais y otros, 2010; IPCC, 2010). Estos estudios concluyeron que la realización de este enfoque requeriría una inversión adicional en materia de investigación, incrementando la densidad de mediciones atmosféricas de GEI bien calibradas y mejorando la modelización del transporte atmosférico y la capacidad de asimilación de datos.

La necesidad de armonización y documentación de metodologías para la estimación de emisiones a partir de las observaciones atmosféricas, así como el intercambio de buenas prácticas, llevó a la creación del Sistema Mundial Integrado de Información sobre los Gases de Efecto Invernadero (*Boletín de la OMM* 66 (1), 2017) en el Decimoséptimo Congreso Meteorológico Mundial en 2015.

Estimaciones de emisiones para respaldar los inventarios nacionales

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que entró en vigor en 1994, es ahora un acuerdo casi universal con 197 países participantes. Las partes en la Convención se comprometieron a "actualizar periódicamente, publicar y facilitar (...) inventarios nacionales de las emisiones

antropógenas por las fuentes y de la absorción por los sumideros de todos los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal". Las metodologías no estaban bien definidas al principio, y se pidió a los países que solo informaran en la medida en que sus capacidades lo permitieran. Sin embargo, muchos países comenzaron a recopilar y dar información sobre emisiones de GEI, aunque con diferentes niveles de detalle y frecuencia.

Con la entrada en vigor del Protocolo de Kyoto en 2005, la comunicación anual de informes de inventarios nacionales (IIN) se hizo obligatoria para todos los países (desarrollados) del Anexo 1. Los detalles se especificaron en las Directrices del IPCC de 2006, que proponían un enfoque por niveles. El más básico, el Nivel 1, se basa en factores de emisión por defecto mientras que en los más detallados, los Niveles 2 y 3, se pueden incorporar métodos, datos y modelos específicos del país. Se dio otro paso adelante cuando el Acuerdo de París introdujo la provisión de IIN por parte de todos los países firmantes cada dos años. La preparación y entrega de un IIN plantea un gran desafío para los países en desarrollo que aún tienen que aprender el proceso de presentación de informes oficiales.

Desarrollar un inventario de emisiones de GEI supone un desafío porque se debe utilizar una amplia gama de información dependiendo de los tipos de fuente. Los datos estadísticos socioeconómicos, entre otros, pueden no estar disponibles con suficiente detalle y antelación. Los inventarios nacionales de emisiones proporcionan información detallada sobre fuentes individuales, lo que permite a las instancias normativas evaluar su participación relativa y diseñar medidas eficaces de reducción de emisiones. Sin embargo, la calidad de estos inventarios solo puede evaluarse verificando la integridad y el cumplimiento de los procedimientos recomendados. El número más relevante en términos de efectos del cambio climático, es decir, específicamente las emisiones totales por país, no puede evaluarse por medios independientes.

Dado que las concentraciones atmosféricas responden a la suma de todas las emisiones, las estimaciones basadas en observaciones pueden proporcionar información muy valiosa sobre los límites de las emisiones totales de un país. Sin embargo, son menos convenientes para proporcionar información sobre categorías de fuentes individuales ya que las múltiples fuentes y sumideros interactúan entre ellos. En ese sentido, los inventarios y las estimaciones basadas en observaciones son complementarios y deberían usarse de forma

conjunta para mejorar y generar confianza en las estimaciones nacionales de emisiones. Con densas redes de observación y con la medición de parámetros auxiliares, como la composición isotópica de gases de efecto invernadero o las concentraciones de gases coemitidos, se puede obtener información adicional específica de cada fuente para respaldar la validación de los inventarios nacionales de emisiones más allá de los totales de los países. Las estimaciones basadas en observaciones pueden ser particularmente valiosas para gases traza con grandes incertidumbres en sus emisiones.

Mejoras en la ciencia

Las estimaciones de emisiones de los totales nacionales basadas en técnicas de modelización inversa han mejorado mucho en los últimos 20 años. La implementación de este enfoque incluye una combinación de observaciones atmosféricas y modelos, y comprende cuatro componentes fundamentales, los cuales han experimentado un desarrollo significativo durante este periodo de tiempo:

1. Las observaciones atmosféricas son mucho más precisas, y ahora se dispone de instrumentos más robustos. Además, la frecuencia de las mediciones y el número de estaciones de observación han aumentado considerablemente, con redes ampliadas que se han desarrollado en muchos países como Alemania, Australia, China, Estados Unidos de América, India, Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte y Suiza. Asimismo, la teledetección satelital de GEI ha avanzado notablemente desde las primeras mediciones de columnas totales de CO₂ y metano (CH₄) por el Espectrómetro de absorción de imágenes mediante exploración para cartografía de la atmósfera (SCIAMACHY) en 2002. Hoy en día, satélites como GOSAT, OCO-2 y TROPOMI están proporcionando observaciones con precisiones que son suficientes para acotar las emisiones a grandes escalas regionales. Sin embargo, hace falta mejoras adicionales en cobertura, resolución, gases observados y precisión para llegar a los límites de escala de los países individuales y los puntos críticos de emisión. El Comité sobre Satélites de Observación de la Tierra (CEOS) coordina las actividades relacionadas con las observaciones del sistema terrestre desde satélites y desarrolla estrategias a largo plazo para su evolución. En particular, el citado Comité definió recientemente una arquitectura global para monitorizar el CO₂ y el CH₄ atmosféricos que incluye el estado actual de las mediciones de GEI por

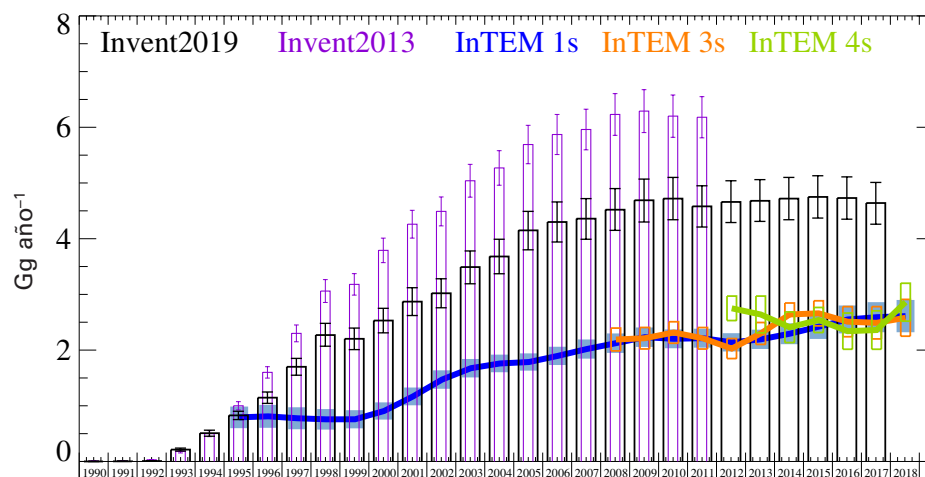


Figura 3. Estimaciones de emisiones del Reino Unido de HFC-134a. Valores notificados del inventario: en color morado, los presentados en 2013; en negro, los presentados en 2019. Estimaciones del modelo inverso (InTEM): azul, usando una estación de observación; naranja, usando tres estaciones de observación; verde, utilizando cuatro estaciones de observación.

satélite y que se refiere al Sistema Mundial Integrado de Información sobre los Gases de Efecto Invernadero como un marco común⁶.

- La evolución temporal de la meteorología tridimensional ha visto avances significativos a través de una mejor asimilación de datos, una mayor potencia de computación, una mejor representación de los procesos atmosféricos y una mayor resolución espacial. Por ejemplo, la resolución horizontal de los modelos operativos globales de predicción del tiempo ha evolucionado desde los 80 km de hace 20 años hasta los entre 9 km y 20 km de ahora, con mejoras similares en la dimensión vertical.
- Los modelos de transporte, que están impulsados por estos campos meteorológicos tridimensionales, han madurado considerablemente a través de aplicaciones en una multitud de proyectos de investigación. Ahora pueden usar más parámetros meteorológicos a una resolución espacial y temporal más alta que antes. Además, se han desarrollado modelos integrados en línea, que calculan la meteorología y el transporte de GEI de forma simultánea y coherente dentro del mismo modelo.

- Los modelos inversos, que integran la información de las observaciones y los modelos de transporte atmosférico, han visto cambios importantes con el uso mejorado de algoritmos avanzados que combinan de manera óptima la información de las observaciones atmosféricas con el conocimiento sobre la distribución de emisiones.

Ejemplos de países

Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte

Para evaluar la calidad de las emisiones notificadas en el inventario nacional, el Reino Unido utiliza un método completamente independiente (descrito en Arnold y otros, 2018) para obtener sus estimaciones de emisiones de GEI que se basan en una combinación de observaciones atmosféricas y modelos inversos. Los resultados se notifican anualmente en el IIN del Reino Unido a la CMNUCC. El Reino Unido utiliza las diferencias significativas entre el inventario de emisiones y las estimaciones basadas en la observación para identificar las áreas del inventario que necesitan un mayor estudio. Su red de emplazamientos de observación, denominada Red de Estudio de las Emisiones Vinculadas al Cambio Climático (Stanley y otros, 2018), consiste principalmente en antenas de telecomunicaciones con torres elevadas dotadas de equipo de observación de última generación que mide el CO₂, el CH₄, el óxido nitroso (N₂O), los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC),

6 CEOS White Paper: "A Constellation Architecture for Monitoring Carbon Dioxide and Methane from Space" (Libro blanco del CEOS: "Arquitectura de la constelación de satélites para monitorizar el dióxido de carbono y el metano desde el espacio")

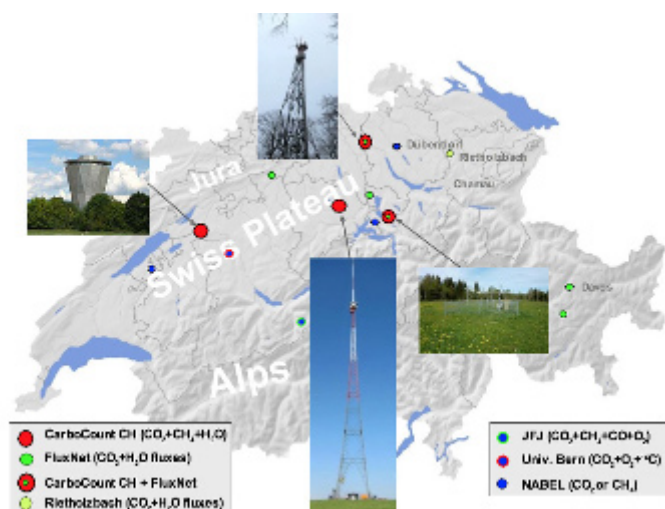


Figura 4. Red de medición CarboCount-CH de Suiza, creada en 2012 para medir CH_4 y CO_2 . En Beromünster se instalaron instrumentos adicionales en 2016 y 2019 para medir N_2O y GEI sintéticos respectivamente. (Fuente: Oney y otros, 2015).

el hexafluoruro de azufre (SF_6) y el trifluoruro de nitrógeno (NF_3) con una alta frecuencia, precisión y exactitud.

En la figura 3 se muestra un ejemplo reciente de cómo se han utilizado las estimaciones de emisiones basadas en la observación para notificar la estimación del inventario tradicional. En el Informe del inventario del Reino Unido de 2013, las estimaciones de emisiones anuales para el HFC-134a (barras moradas), un gas utilizado sobre todo en los aires acondicionados móviles y, en menor medida, como propulsor de aerosoles, fueron coherentemente más altas en más del 50 % que las estimaciones basadas en la observación (líneas azul y naranja) desde 1998 en adelante. Este resultado motivó al Reino Unido a contratar a un experto de la industria para revisar las estimaciones del inventario de HFC-134a del país. Como consecuencia de ello, se ha revisado la estimación del inventario y se ha acercado a las estimaciones del modelo inverso, como se aprecia en las barras negras de la figura. Todavía queda trabajo por hacer para cerrar la brecha por completo.

Suiza

En 2012, Suiza creó una red de observación de GEI con una torre elevada y estaciones adicionales en colinas y torres más pequeñas (figura 4, Oney y otros, 2015). Junto con el largo registro de observaciones en la alta estación alpina de Jungfraujoch, estas mediciones se usaron para estimar las emisiones de CH_4 en Suiza, que fueron coherentes con el inventario nacional (Henney y otros, 2016). Desde 2016, estas estimaciones se han notificado anualmente en un anexo del IIN suizo de la CMNUCC. La

coherencia se ha confirmado para todos los años estudiados hasta el momento (2013-2017).

En 2018 se establecieron mediciones adicionales de N_2O y en el IIN suizo de 2019 se publicó una primera estimación obtenida a partir de las mismas que sugirió que las emisiones de N_2O , en contraste con el CH_4 , pueden haber sido subestimadas hasta en un 30 %. Sin embargo, debido a las grandes incertidumbres en el inventario y en las estimaciones basadas en la observación, la diferencia no fue estadísticamente significativa con lo que se necesitarán más años de observaciones para corroborar estas diferencias.

Dado que las observaciones de HFC y otros GEI sintéticos solo están disponibles para el emplazamiento de Jungfraujoch, para estimar las emisiones de HFC se emplea un método más simple de correlación entre especies que no requiere ningún modelo de transporte atmosférico. Estas estimaciones también se han notificado en el IIN suizo desde 2016 y han mostrado una amplia coherencia con las cifras de inventario tradicionales para la mayoría de las especies. Para obtener estimaciones más sólidas para los gases sintéticos, en agosto de 2019 comenzaron a realizarse mediciones adicionales en la estación de la torre elevada de Beromünster (figura 4).

Australia

Australia incorporó la verificación atmosférica en su IIN anual en 2009. La Organización de Investigaciones Científicas e Industriales de la Commonwealth (CSIRO) y el

Servicio Meteorológico del Reino Unido estiman las emisiones de GEI sintéticos (HFC, PFC y SF₆) del sureste de Australia a partir de las observaciones atmosféricas obtenidas en Cape Grim, Tasmania, utilizando técnicas de modelización inversa y de correlación entre especies. Las emisiones del sureste australiano de estos GEI sintéticos se extrapolan a las emisiones de todo el país en función de la población o de la actividad.



Oficina de Meteorología de Australia

Estación de Cape Grim, Tasmania. (Fuente: Oficina de Meteorología de Australia).

La comparación de las estimaciones de emisiones basadas en observaciones atmosféricas con las emisiones en el inventario tradicional australiano mostró diferencias significativas para los HFC, PFC y SF₆ individuales, pero las emisiones agregadas de estos GEI sintéticos de ambas estimaciones estaban de acuerdo en general.

Siguiendo la recomendación del IPCC, los factores de emisión anuales de HFC australianos a partir de 2006 y los de SF₆ a partir de 2010 se han ajustado de acuerdo con las emisiones de HFC y SF₆ estimadas a partir de las concentraciones atmosféricas y las tendencias medidas en Cape Grim. Además de la calibración de los factores de emisión anuales, las fluctuaciones de HFC observadas en Cape Grim también se utilizan para variar la especiación de gases en el modelo de emisiones de HFC utilizado en el inventario. Los factores de emisión de PFC en el inventario no se han ajustado hasta la fecha para reflejar las emisiones de PFC obtenidas a partir de los datos atmosféricos. En el futuro, Australia prevé usar observaciones de GEI de una variedad de estaciones (por ejemplo, Aspendale, en Victoria) y de plataformas como buques de investigación, con técnicas de correlación

entre especies y de modelización inversa mejor orientadas para aumentar la exactitud de las estimaciones basadas en observaciones de las emisiones regionales y nacionales.

Como las Directrices del IPCC de 2006 no proporcionan ningún consejo sobre el uso directo de las estimaciones de emisiones del modelo inverso, Australia ha optado por utilizar las fluctuaciones en las estimaciones del modelo para ajustar las tasas anuales de fugas de HFC y SF₆, asegurando así que las tendencias en las observaciones atmosféricas se reproduzcan en el inventario. La fortaleza de este enfoque es que permite que las estimaciones de emisiones del inventario reflejen mejor las mejoras en la práctica industrial en términos de manejo de gas, mantenimiento de equipos y desmantelamiento.

Papel del Sistema Mundial Integrado de Información sobre los Gases de Efecto Invernadero en el desarrollo de estimaciones de emisiones basadas en observaciones

Como documento que aborda la compilación de inventarios, el *Perfeccionamiento de 2019* de las directrices del IPCC no proporciona una guía detallada sobre la implementación del sistema nacional de medición y modelización atmosféricas. En cambio, se refiere a ejemplos de países, recomendaciones de la VAG de la OMM sobre técnicas de observación y al Plan de Implementación Científica del Sistema Mundial Integrado de Información sobre los Gases de Efecto Invernadero⁷ para obtener más orientación. Las *Directrices del IPCC de 2006* y el *Perfeccionamiento de 2019* promueven el uso de estimaciones de emisiones basadas en mediciones atmosféricas, pero siguen siendo cautelosos sobre posibles dificultades para implementar dicho enfoque.

Cuando se trata de encontrar la forma más eficiente de utilizar las mediciones atmosféricas para las estimaciones de emisiones, el *Plan de Implementación Científica del Sistema Mundial Integrado de Información sobre los Gases de Efecto Invernadero* describe una serie de técnicas disponibles para crear nuevos sistemas nacionales y mejorar los existentes. Las técnicas planificadas o ya

7 WMO, 2019. An Integrated Global Greenhouse Gas Information System (IG3IS) Science Implementation Plan, GAW Report- No. 245

probadas ofrecen recomendaciones para el tipo de algoritmos de modelización inversa, los modelos de transporte atmosférico, la elección de los emplazamientos de observación y el tipo de dispositivos de medición y qué parámetros opcionales podrían medirse. También hay desafíos nuevos y específicos de cada país, a afrontar por quienes implementan las estimaciones basadas en las mediciones atmosféricas. Existen ejemplos de trabajo de sistemas nacionales que se construyen en países aislados de otros por océanos o cordilleras. Las inversiones atmosféricas operativas en un país situado a favor del viento de fuentes intensas de GEI presentarán diferentes desafíos.

El Sistema Mundial Integrado de Información sobre los Gases de Efecto Invernadero juega un papel importante al proporcionar un marco común para el desarrollo de metodologías armonizadas y análisis comparado. Como comunidad de expertos, el citado Sistema Mundial está bien posicionado para apoyar el desarrollo y la evaluación de la experiencia necesaria, y para ofrecer orientación para superar las dificultades técnicas basadas en la ciencia y la experiencia actuales de los equipos nacionales que ya han establecido sistemas de trabajo. Quienes implementan un enfoque basado en la observación en su país como apoyo para el inventario de GEI pueden contactar con el equipo del Sistema Mundial a través de su sitio web (ig3is.wmo.int) y recibirán un asesoramiento personalizado que tiene en cuenta las circunstancias y condiciones específicas en su país.

Referencias

- Arnold, T. y otros, 2018. Inverse modelling of CF₄ and NF₃ emissions in East Asia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18:13305-13320.
- Ciais, P. y otros, 2010. Geo Carbon Strategy. Geneva, GEO Secretariat / Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fraser, P. J. y otros, 1983. Global distribution and southern hemispheric trends of atmospheric CCl₃F. *Nature*, 302:692-695.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático / Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Preparado por el Programa de inventarios nacionales de gases de efecto invernadero del IPCC (H. S. Eggleston, L. Buendía, K. Miwa, T. Ngara y K. Tanabe, eds). Hayama (Japón), Instituto para las Estrategias Ambientales Globales (IGES).
- , 2010. Expert Meeting on Uncertainty and Validation of Emission Inventories (H. S. Eggleston, J. Baasansuren, K. Tanabe y N. Srivastava, eds.). Utrecht, the Netherlands, 23-25 March 2010.
- , 2019. Perfeccionamiento de las Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero de 2006 (versión adelantada de la publicación, aceptada por el IPCC).
- Henne, S. y otros, 2016. Validation of the Swiss methane emission inventory by atmospheric observations and inverse modelling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(6):3683-3710.
- National Research Council, 2010. Verifying Greenhouse Gas Emissions: Methods to Support International Climate Agreements. Washington, DC, The National Academies Press.
- Oney, B. y otros, 2015. The CarboCount CH sites: Characterization of a dense greenhouse gas observation network. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(19):11147-11164.
- Organización Meteorológica Mundial, 2018. *Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero*, n° 14. 22 de noviembre de 2018. Ginebra.
- Stanley, K. M. y otros, 2018. Greenhouse gas measurements from a UK network of tall towers: technical description and first results. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(3):1437-1458.